

Δελτ. Ελλ. Γεωλ. Εταιρ.	Τομ.	σελ.	Αθήνα
Bull. Geol. Soc. Greece	XIX	365-386	1987
	Vol.	pag.	Athens

ΠΙΘΑΝΟΛΟΓΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΑΠΟ ΜΕΤΑΣΕΙΣΜΟΥΣ ΜΙΑΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΠΟΛΗ ΛΑΡΙΣΑ

Κ. Χ. ΜΑΚΡΟΠΟΥΛΟΣ*

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι συνεχώς και μεγαλύτερη βιομηχανική, εμπορική και οικιστική ανάπτυξη των πόλεων έχει σαν αποτέλεσμα οι κατοικημένες περιοχές να επεκτείνονται διαρκώς γύρω τους. Έτσι οι συνέπειες τυχόν καταστροφής έργου μεγάλης σημασίας όπως π.χ. φράγματος, γέφυρας, πετροχημικής μονάδας κ.α., να είναι πολύ μεγαλύτερες απ' ό,τι θα ήταν πριν μερικές δεκαετίες. Εξ' άλλου η μελέτη καταστροφικών σεισμών σε παγκόσμια κλίμακα έδειξε ότι πολύ συχνά οι ισχυροί μετασεισμοί που τους συνοδεύουν προξένησαν πρόσθετες σημαντικές βλάβες στις ήδη καταπονημένες κατασκευές. Πιό πρόσφατο Ελληνικό παράδειγμα είναι οι σεισμοί της Κορινθίας του 1981. Οι μεγαλύτερες καταστροφές προξενήθηκαν από τους σεισμούς που ακολούθησαν εκείνη της 24 Φεβρουαρίου. Για τους παραπάνω λόγους σε κάθε αντισεισμικό σχεδιασμό είναι απαραίτητο να παίρνεται υπόψη και η πιθανότητα να γίνουν ισχυροί μετασεισμοί, πριν προφτάσουν να γίνουν οι απαραίτητες ενισχυτικές και διορθωτικές εργασίες.

Ο σκοπός λοιπόν αυτής της εργασίας είναι να καθορίσει τον αριθμό και μέγεθος τέτοιων μετασεισμών που ο σχεδιαστής μηχανικός θα πρέπει να πάρει υπόψη του για να υπολογίσει τη συσσωρευτική επίδρασή τους στην κατασκευή. Σαν περιοχή μελέτης διαλέχθηκε η Λάρισα, μιά πόλη που βρίσκεται σε βιομηχανική και αγροτική ανάπτυξη. Οι μετασεισμικές σειρές που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη είναι σειρές με κύριους σεισμούς της τάξης μεγέθους που αναμένονται για την περιοχή. 1

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Για τον υπολογισμό και την εκτίμηση της μετασεισμικής δραστηριότητας, η πιθανολογική προσέγγιση έχει δείξει ότι αποτε-

Ψηφιακή Βιβλιοθήκη "Θεόφραστος" - Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ.

* Δέκτορας στο Πανεπιστήμιο της Αθήνας, Τμήμα Γεωλογικό, Τομέας Γεωφυσικής-Γεωθερμίας

λεί την καλύτερη λύση. Πιθανολογικά μοντέλα χρησιμοποιούνται γενικά για τον καθορισμό των μεγεθών και της πιθανότητας να συμβούν διάφορα σπάνια καταστροφικά φυσικά φαινόμενα, όπως μεγάλες πλημμύρες, ισχυροί άνεμοι κλπ., τα οποία επηρεάζουν κρίσιμες κατασκευές, όπως ψηλόκορμα κτήρια, φράγματα, απαστραγγιστικά συστήματα κ.α. Με τον ίδιο τρόπο θεωρώντας τους καταστροφικούς σεισμούς σαν τέτοια σπάνια γεγονότα, με την πιθανολογική προσέγγιση είναι δυνατόν να υπολογίσουμε το ρυθμό εμφάνισής τους σ' ένα τόπο. Έτσι, ο τρόπος αυτός της προσέγγισης του προβλήματος μπορεί να δώσει στο σχεδιαστή μηχανικό μία ποσοτική δυνατότητα για ένα πιο ασφαλή σχεδιασμό του Έργου.

Στην περίπτωση των σεισμών, τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό του ρυθμού εμφάνισής τους αποτελούνται από καταλόγους σεισμών της περιοχής. Τέτοιοι κατάλογοι πρέπει να περιέχουν όλες εκείνες τις πληροφορίες που θα επιτρέπουν τη στατιστική επεξεργασία τους και που είναι οι συντεταγμένες των εστιών (γ. μήκος, γ. πλάτος, βάθος), τα μεγέθη και οι εντάσεις τους. Ο ρυθμός εμφάνισης σε συνδυασμό με υπάρχοντες νόμους απορρόφησης της ενέργειας από την εστία μέχρι τη μελετούμενη περιοχή επιτρέπουν τον υπολογισμό του χρόνου επανάληψης σεισμού που μπορεί να προκαλέσει μία συγκεκριμένη στάθμη εδαφικής κίνησης, είτε αυτή μετριέται σε επιτάχυνση ή ταχύτητα ή μετατόπιση των εδαφικών μορίων.

Η πιθανολογική ανάλυσή γενικά βασίζεται σε δύο προϋποθέσεις. Πρώτον, η σεισμική δραστηριότητα στην περιοχή, ή κατά μήκος γνωστών ρηγμάτων με χαρακτηριστική σεισμικότητα, είναι ομοιόμορφα κατανομημένη στο χώρο. Δεύτερον, ο ρυθμός επανάληψης για σεισμούς με δεδομένο μέγεθος μελλοντικά στην περιοχή υποτίθεται ότι παραμένει ο ίδιος με εκείνον στο παρελθόν. Η πρώτη παραδοχή της ομοιόμορφης κατανομής στο χώρο είναι αρκετά συντηρητική, μιά και θεωρεί ισοπιθανά όλα τα σημεία γύρω από την περιοχή/σ' όλο το μήκος του ρήγματος. Έτσι πλησιάζει τους σεισμούς της πηγής στο πιο κοντινό σημείο προς τη θέση μελέτης. Σε ότι αφορά τη δεύτερη παραδοχή, αλλαγές στην γενική εικόνα της σεισμικότητας αναγκαστικά σχετίζονται με γεωλογικές

διαδικασίες που συμβαίνουν με πολύ αργό ρυθμό. Οι μερικές δεκαετίες ζωής ενός έργου είναι ελάχιστες μπροστά στο χρόνο των γεωλογικών μεταβολών. Εξ' άλλου η σεισμική ιστορία συνήθως δεν είναι χρονικά τόσο μεγάλη ώστε να δείξει σημαντικές μεταβολές στο σεισμικό καθεστώς μιάς περιοχής. Έτσι είναι ρεαλιστικό να υποθέτουμε ότι η εμφάνιση των σεισμών στο μέλλον θα μιμηθεί εκείνη του παρελθόντος.

Η επέκταση των πιθανολογικών μεθόδων στους μετασεισμούς απαιτεί μιά σύντομη εξέταση των παραπάνω προϋποθέσεων. Εξ' ορισμού μετασεισμοί είναι οι σεισμοί που γίνονται στην περιοχή γύρω από τον κύριο σεισμό και σε χρονικό διάστημα από μερικές ημέρες έως μήνες μετά από αυτόν. Μελετώντας τώρα όσο γίνεται πιο πολλές μετασεισμικές σειρές είναι δυνατόν να υπολογιστεί στατιστικά ο αναμενόμενος αριθμός των μετασεισμών σαν ο στατιστικός μέσος του δείγματος.

Στη μελέτη αυτή, σαν μετασεισμική περιοχή ορίζεται κύκλος ακτίνας μισής μούρας με κέντρο τον κύριο σεισμό. Για κάθε κύριο σεισμό που χρησιμοποιήθηκε, συγκεντρώθηκαν όλοι οι σεισμοί μέσα στην περιοχή που έγιναν σε χρονικό διάστημα έως έξι μηνών από το χρόνο γένεσης του κύριου σεισμού. Το σύνολο όλων αυτών των σεισμών αποτέλεσαν τη σεισμική σειρά του δείγματος. Η περίοδος των έξι μηνών σαν το όριο διάρκειας κάθε σειράς καθορίστηκε τόσο από τη διεθνή και Ελληνική εμπειρία, εκτός από ελάχιστες εξαιρέσεις, όσο και κυρίως γιατί το διάστημα των έξι μηνών κρίνεται αρκετό για να γίνουν οι απαραίτητες ενισχυτικές εργασίες στο συγκεκριμένο έργο που εξ' άλλου αποτελεί και το αντικείμενο αυτής της μελέτης. Από όλες τις σεισμικές σειρές που προέκυψαν βρέθηκε ο στατιστικός μέσος των μετασεισμών που είναι ικανοί να δώσουν επιτάχυνση μεγαλύτερη ή ίση μιάς δεδομένης στάθμης στη θέση ενδιαφέροντος.

3. ΣΕΙΣΜΙΚΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

3.1. Κατανομή των σεισμών στο χώρο

Η εικόνα 1, δείχνει την κατανομή των επιφανειακών σεισμών στον Ελληνικό χώρο και έχει ληφθεί από την εργασία των Μακροπου-

KEY TO SYMBOLS	
DEPTHS (SYMBOL TYPES)	
○	0-10
□	10-50
△	50-100
◇	100-200
×	200-500
+	500-1000
MAGNITUDE (SYMBOL RADII)	
○	3.00
□	3.50
△	4.00
◇	4.50
×	5.00
+	5.50
○	6.00
□	6.50
△	7.00
◇	7.50
×	8.00
+	8.50

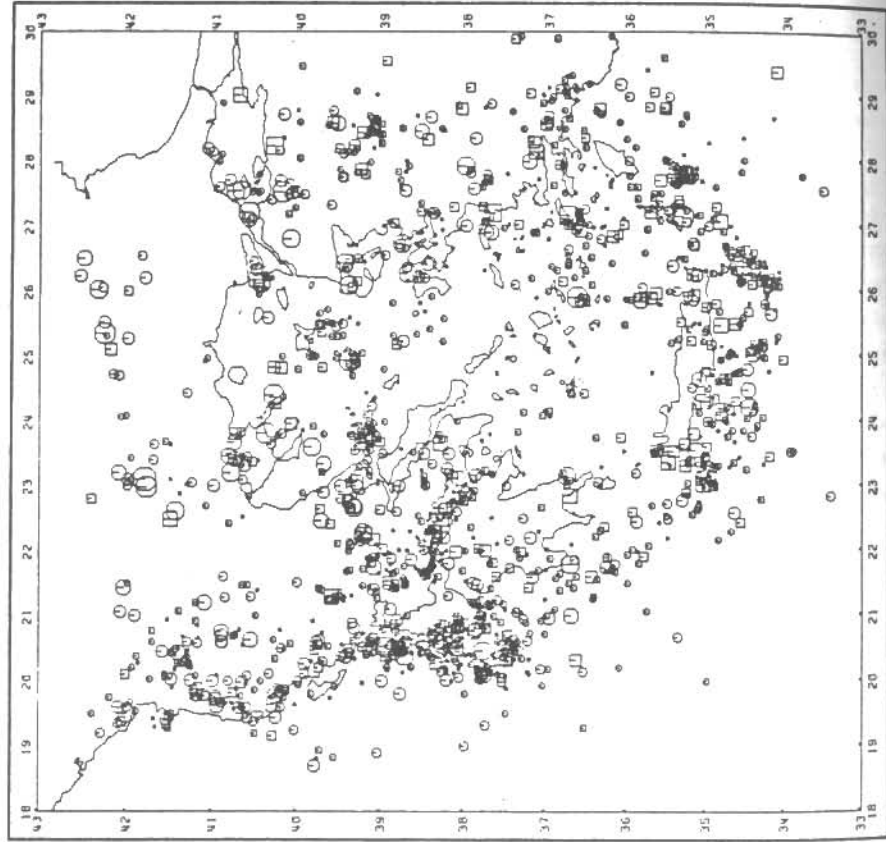


Fig.1 Spatial distribution of the epicentres of shallow depth earthquakes for Greece since 1901. (After Makropoulos and Burton, 1981).

los και Burton (1981). Αφορά την περίοδο 1901 μέχρι 1978 όπως φαίνεται από την εικόνα, η περιοχή της Λάρισσας βρίσκεται βόρεια της σεισμικής ζώνης που διατρέχει την κεντρική Ελλάδα σε μία διεύθυνση ΑΒΑ-ΑΝΑ από την Λευκάδα μέχρι το Παγασητικό κόλπο. Στη ζώνη αυτή ανήκουν και οι δύο μεγαλύτεροι σεισμοί που έπληξαν την περιοχή. Είναι οι σεισμοί της 30ης Απριλίου 1934 ($M=6.7, h=16\text{km}$) με εστία που απείχε 50 χιλιόμετρα από την πόλη και ο σεισμός της 8 Μαρτίου 1957 ($M=6.8, h=30\text{ km}$) που η εστία του απείχε 49 χιλιόμετρα από την πόλη. Βόρεια της Λάρισσας, η περιοχή χαρακτηρίζεται από σχετικά χαμηλότερη σεισμικότητα. Έτσι η κύρια πηγή δραστηριότητας προέρχεται κυρίως από τη ζώνη νότια του 40 παράλληλου.

3.2. Παράμετροι σεισμικής επικινδυνότητας

Οι Δακоруλος and Makropoulos (1983) και Makropoulos and Burton (1983), στις μελέτες της σεισμικής επικινδυνότητας της περιοχής με ακτίνα 100 χιλμ. γύρω από τη Λάρισα βρήκαν τις παρακάτω τιμές:

- α) Πιο πιθανό ετήσιο μέγιστο μέγεθος (annual mode): 4.3
- β) Πιο πιθανό μέγιστο μέγεθος μέσα σε 80 χρόνια: 6.8 ± 0.1 και
- γ) Μέγεθος που έχει 95% πιθανότητα να μη γίνει υπέρβασή του στα επόμενα 50 χρόνια (δηλαδή περίοδος επανάληψης 975 χρόνια) : 7.0 ± 0.2

Έχοντας υπ' όψη ότι ο χρόνος ζωής ενός έργου συνήθως δεν ξεπερνά τα 50 χρόνια, το μέγεθος που έχει μόνο 5% πιθανότητα να γίνει υπέρβασή του στη διάρκεια της σχεδιαζόμενης ζωής του (δηλαδή εδώ το $M=7.0$) υιοθετήθηκε σαν σεισμός σχεδιασμού για τη Λάρισα.

3.3. Νόμος Απόσβεσης της μέγιστης επιτάχυνσης

Κάθε κύριος σεισμός ή μετασεισμός που μπορεί να γίνει στην περιοχή θα προξενήσει στη θέση μελέτης και μία μέγιστη επιτάχυνση των εδαφικών μορίων. Ο νόμος απόσβεσης της μέγιστης εδαφικής κίνησης καθώς η ενέργεια διαδίδεται από την εστία προς τις διάφορες κατευθύνσεις ακολουθεί γενικά τον τύπο:

$$Y = ae^{BM(R+C)^{-\gamma}} \quad (1)$$

όπου γ είναι η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση, ταχύτητα ή μετατόπιση, M τό μέγεθος του σεισμού και R η υποκεντρική απόσταση εστίας θέσεως. Τα α, β, γ και c είναι σταθερές. Από το 1964 όταν οι Esteva and Rosenblueth πρότειναν τα παραπάνω γενικό τύπο, οι περισσότεροι τύποι που προτάθηκαν είναι παραλλαγές προσαρμοσμένες σε τοπικές συνθήκες όπου αυτό ήταν δυνατόν. Και αυτό γιατί δεν υπάρχουν πολλά τοπικά εγγραφήματα που να επιτρέπουν νέου τύπου εμπειρικούς νόμους.

Γιά την Ελλάδα ο Markopoulos (1978) χρησιμοποιώντας τους πιο γνωστούς και εφαρμοσμένους διεθνώς τύπους για τη μέγιστη επιτάχυνση, υπολόγισε το μέσο τύπο:

$$A = 2164 e^{0.7(R+20)^{-1.80}} \text{ cm/sec}^2 \quad (2)$$

Ο τύπος αυτός που ισχύει για σκληρά εδάφη, βρίσκεται σε πολύ καλή συμφωνία με τις τιμές μέγιστης επιτάχυνσης που καταγράφηκαν από επιταχυνσιογράφους στον Ελληνικό χώρο από το 1972 (Drakopoulos, 1976). Έτσι, σ'αυτή τη μελέτη, στον υπολογισμό της μέγιστης επιτάχυνσης που αναμένεται από κάθε κύριο ή μετασεισμό στην πόλη υιοθετείται ο νόμος απόσβεσης της σχέσης (2).

4. ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΩΝ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΣΕΙΡΩΝ

Με βάση τα όσα αναφέρθηκαν πιο πάνω για την επιλογή των σεισμικών σειρών χρησιμοποιήθηκαν τα εξής κριτήρια:

- α) Τα μεγέθη των κύριων σεισμών να είναι μεταξύ 6.0 και 7.2
- β) Μετασεισμοί θεωρήθηκαν όλοι εκείνοι οι σεισμοί που έγιναν σε χρονικό διάστημα μέχρι 6 μηνών από τη στιγμή γένεσης του κύριου σεισμού και σε απόσταση μισής μούρας από το επίκεντρο του. Δηλαδή μιά περιοχή με πλευρές περίπου μιάς μούρας.
- γ) Σύμφωνα με τη σχέση (2) και για ένα μέσο βάθος 15 χλμ. για να έχουμε μέγιστη επιτάχυνση πάνω από το όριο των 0.1g πρέπει τό μέγεθος να είναι μεγαλύτερο του 4.8. Έτσι από κάθε σειρά επιλέχθηκαν μόνο μετασεισμοί με $M \geq 4.8$.

TABLE 1
EARTHQUAKE MAIN-SHOCKS SUITABLE FOR ANALYSIS

No.	DATE	LOCATION		DEPTH	MAGN.	NUMBER OF AFTERSHOCKS $M \geq 4.8$
		LAT. N	LONG. E			
1.	1912 JAN 24	38.10	20.50	11	6.3	14
2.	1914 OCT 17	38.20	23.20	8	6.0	3
3.	1915 JAN 27	38.50	20.60	15	6.3	3
4.	1915 AUG 7	38.50	20.50	12	6.5	19
5.	1919 DEC 22	39.80	20.60	10	6.0	1
6.	1920 NOV 26	40.30	19.50	8	6.0	3
7.	1922 NOV 4	36.70	20.30	35	6.0	1
8.	1923 DEC 5	39.80	23.60	20	6.6	1
9.	1928 APR 18	42.30	25.40	8	7.1	12
10.	1928 APR 22	38.10	23.10	8	6.5	3
11.	1930 FEB 23	39.90	22.80	70	6.1	3
12.	1930 NOV 21	40.30	19.60	42	6.1	3
13.	1931 MAR 8	41.40	22.60	6	6.8	1
14.	1932 SEP 26	40.40	23.80	5	7.1	13
15.	1938 JUL 20	38.30	23.70	42	6.1	1
16.	1941 MAR 1	39.70	22.50	25	6.3	5
17.	1942 AUG 27	41.60	20.60	12	6.0	0
18.	1947 OCT 6	36.70	21.80	2	6.7	1
19.	1948 APR 22	38.70	20.40	12	6.7	2
20.	1953 AUG 12	38.10	20.70	11	7.3	36
21.	1954 APR 30	39.20	22.30	16	6.7	9
22.	1957 FEB 19	36.30	21.70	28	6.0	0
23.	1957 MAR 8	39.30	22.70	30	6.8	10
24.	1958 AUG 27	37.40	20.70	9	6.5	1
25.	1959 SEP 1	40.90	19.60	26	6.1	2
26.	1959 NOV 15	37.80	20.50	20	6.9	4
27.	1960 MAY 26	40.60	20.60	20	6.4	1
28.	1962 MAR 18	40.70	19.60	15	6.0	0
29.	1962 APR 10	37.80	20.10	5	6.3	7
30.	1963 JUL 26	42.00	21.40	14	6.1	0
31.	1965 MAR 9	39.30	23.80	18	6.3	10
32.	1965 APR 5	37.80	22.00	34	6.0	0
33.	1965 MAR 31	38.10	22.30	45	6.6	2
34.	1966 FEB 5	39.10	21.70	16	6.2	8
35.	1967 MAR 4	39.29	24.60	60	6.8	1
36.	1967 MAY 1	39.60	21.30	34	6.2	7
37.	1967 NOV 30	41.10	20.40	21	6.5	7
38.	1968 FEB 19	39.40	24.90	7	7.2	10
39.	1970 APR 8	38.30	22.60	23	6.2	4
40.	1972 SEP 17	38.30	20.30	33	6.0	1
41.	1976 MAY 11	37.60	20.30	33	6.3	4
42.	1978 JUN 20	40.80	23.20	3	6.4	3
43.	1979 APR 15	42.00	19.00	4	6.9	24
44.	1980 JUL 9	39.30	23.00	8	6.4	12
45.	1981 FEB 24	38.20	22.90	18	6.6	29

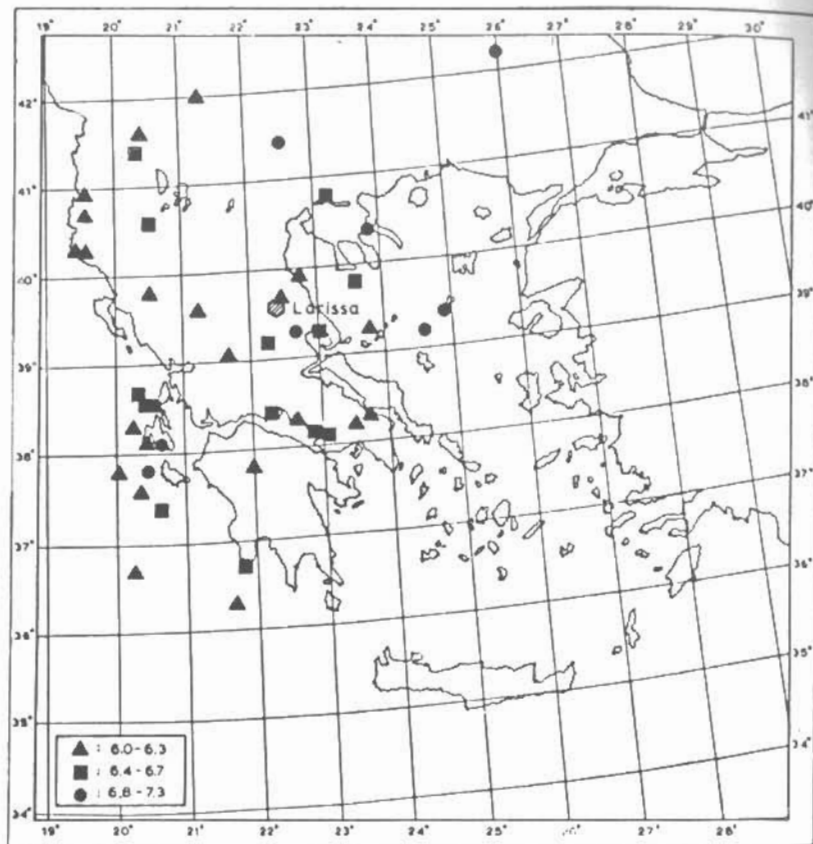


Fig.2. Location of Aftershock Sequences considered in the analysis. Hexagon shows the site area.

Εξαιρώντας όλες τις σειρές που δεν πληρούν τα παραπάνω κριτήρια, ο πίνακας I περιέχει τις σειρές που τελικά χρησιμοποιήθηκαν σ' αυτή τη μελέτη. Ο συνολικός αριθμός των κύριων σεισμών είναι 45 και ο αριθμός των μετασεισμών 281. Η εικόνα 2 δείχνει τις θέσεις των κύριων σεισμών καθώς και τη θέση μελέτης. Πηγές που χρησιμοποιήθηκαν είναι των Parazachos, 1974, Makropoulos and Burton, 1981, Parazachos and Comninakis, 1982.

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

5.1. Υπολογισμός του ρυθμού επανάληψης

Όλοι οι μετασεισμοί κανονικοποιήθηκαν σε σχέση με το σεισμό σχεδιασμού της περιοχής που υιοθετήθηκε δηλ. $M=7.0$. Η κανονικοποίηση έγινε πρώτα υπολογίζοντας τη διαφορά μεταξύ κύριου σεισμού και μετασεισμών και σε δεύτερο στάδιο με την εφαρμογή της διαφοράς αυτής στο σεισμό μεγέθους 7.0 ώστε να υπολογιστούν τα αντίστοιχα μεγέθη των μετασεισμών. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε η σχέση:

$$N = a(7.0 - M)^b \quad (3)$$

όπου N είναι ο αριθμός των μετασεισμών με μέγεθος μεγαλύτερο ή ίσο του M , και a, b σταθερές. Με τη βοήθεια των ελαχίστων τετραγώνων υπολογίστηκαν οι σταθερές a και b .

Έτσι η σχέση (3) είναι:

$$N = 0.99(7.0 - M)^{2.161} \quad \text{με Συντελ.Συσχ. } R=0.99$$

τα πραγματικά δεδομένα και η ευθεία που υπολογίστηκε απεικονίζονται στο σχήμα 3.

5.2. Κατανομή των μετασεισμών στο χώρο

Από την κατανομή των μετασεισμών στο χώρο είναι φανερό ότι αυτοί μπορούν να γίνουν σε αποστάσεις από την εστία του κύριου σεισμού που ποικίλλουν από περίπτωση σε περίπτωση. Αυτό έχει σαν

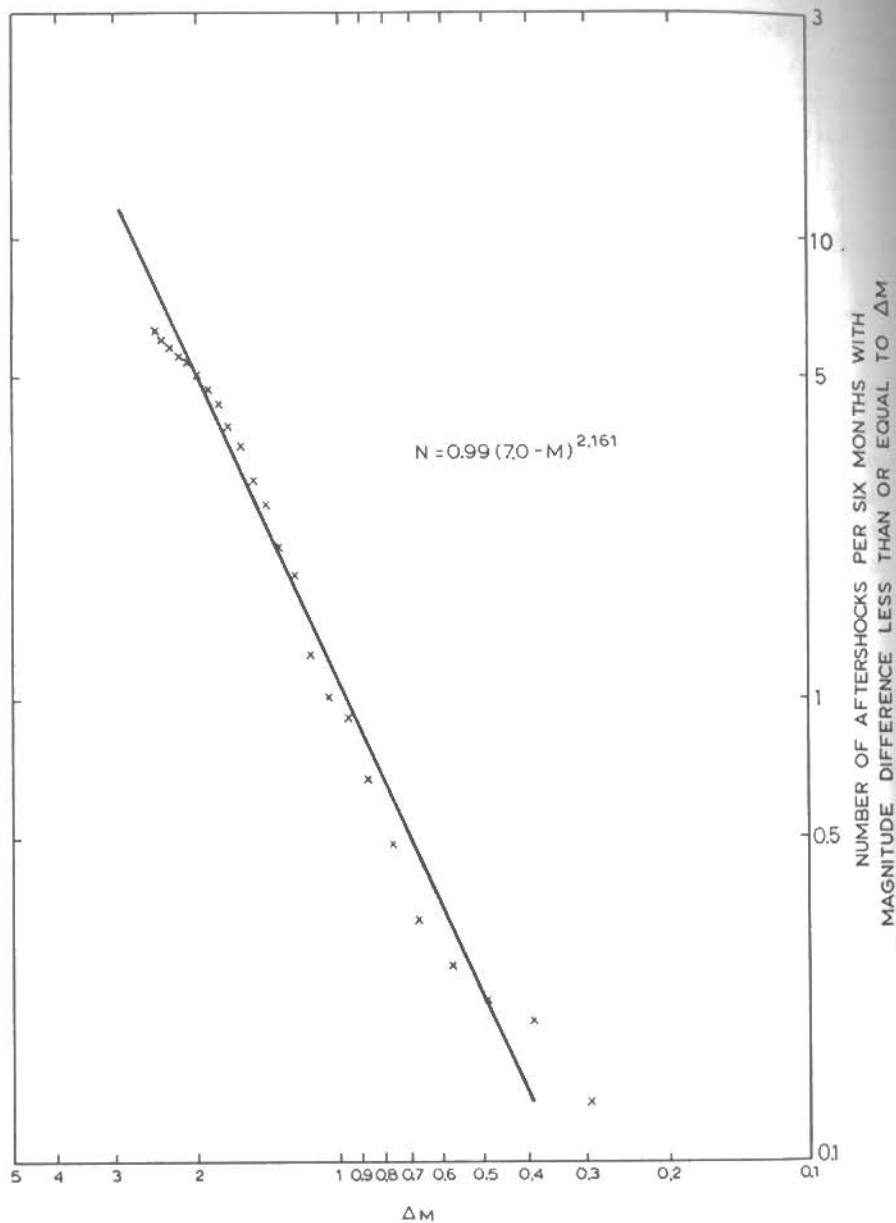


Fig.3 Recurrence relationship for time period of 6 months.

αποτέλεσμα μετασεισμοί του ίδιου μεγέθους να δίνουν διαφορετικές επιταχύνσεις στη θέση ενδιαφέροντος. Αυτό άλλωστε προκύπτει και από το νόμο απόσβεσης της επιτάχυνσης με την απόσταση, σχέση (2). Για να μελετηθεί η συνεισφορά κάθε μετασεισμού στην περίπτωση αυτή, οι μετασεισμοί ομαδοποιήθηκαν ανάλογα με την εστιακή τους απόσταση από τον κύριο σεισμό. Αν και υπάρχουν σεισμοί με βάθος μικρότερο των 15 χλμ., θεωρήθηκε σκόπιμο να μπει ένα όριο εστιακής απόστασης τα 15 χλμ. όπως εξάλλου προκύπτει και από τα επικρατούντα βάθη της περιοχής. Έτσι, όλοι οι μετασεισμοί θεωρήθηκαν ότι έχουν μιά εστιακή απόσταση τουλάχιστον 15 χλμ. Για όσους μετασεισμούς είχε υπολογιστεί βάθος και ήταν μεγαλύτερο των 15 χλμ., τότε το βάθος αυτό χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της εστιακής απόστασης. Σαν αποτέλεσμα της παραπάνω εργασίας προέκυψε το σχήμα 4 που είναι ένα ιστόγραμμα πλήθους μετασεισμών σε συνάρτηση με την εστιακή τους απόσταση από τον κύριο σεισμό. Από το ιστόγραμμα αυτό προκύπτει ότι περίπου το 88% των μετασεισμών συμβαίνουν σε μιά εστιακή απόσταση μικρότερη των 50 χλμ. από την εστία του κύριου σεισμού.

5.3. Σχέση μεταξύ πλήθους μετασεισμών και επιτάχυνσης

Ο συνδυασμός του νόμου απόσβεσης (2) με τη σχέση ρυθμού επανάληψης του τύπου (3) μας δίνει τη σχέση της μορφής:

$$\log N = A - BA_S \quad (4)$$

όπου N είναι ο αριθμός των μετασεισμών με επιτάχυνση στη θέση μελέτης μεγαλύτερη ή ίση δεδομένης A_S . Για τον υπολογισμό των σταθερών A και B της σχέσης (4) ο ρυθμός επανάληψης κάθε μεγέθους εφαρμόστηκε διαδοχικά για διαφορετικές εστιακές αποστάσεις σε συμφωνία με το ιστόγραμμα του σχήματος 4. Το συσσωρευτικό αποτέλεσμα από όλες τις αποστάσεις εκφράζεται από τη σχέση (4). Οι σταθερές A και B υπολογίστηκαν με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Έτσι η σχέση (4) στην περίπτωση μελέτης μας είναι:

$$\log N = 2.62 - 10.43 A_S \quad (5)$$

με συντ. συσχέτισης: $R = 0.98$.

Όπως φαίνεται και από την απεικόνιση της σχέσης (5) στο σχήμα 5, ο αναμενόμενος αριθμός μετασεισμών που είναι ικανοί να δώσουν επιτάχυνση μεγαλύτερη ή ίση μιάς δεδομένης τιμής ελαττώνεται καθώς η επιτάχυνση αυξάνει.

5.4. Πιθανότητες υπέρβασης

Ο αναμενόμενος αριθμός μετασεισμών μέσα σε περίοδο έξι μηνών χρησιμοποιήθηκε για να υπολογιστούν οι πιθανότητες υπέρβασής τους με βάση την παραδοχή ότι οι μετασεισμοί ακολουθούν κατά προσέγγιση την κατανομή Poisson, δηλαδή ο αριθμός των μετασεισμών μέσα στην περίοδο των έξι μηνών δεν μεταβάλλεται με το χρόνο.

Θεωρητικά οι μετασεισμοί δεν είναι ανεξάρτητα γεγονότα και η γένεση του ενός μπορεί να επηρεάσει την πιθανότητα γένεσης του επόμενου μετασεισμού. Παρόλα αυτά όμως, μιά και μελετάμε το συνολικό αριθμό των μετασεισμών κατά τη διάρκεια των έξι μηνών η στατιστική αλληλοεξάρτησή τους δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα. Με δεδομένο λοιπόν ότι έγινε ένας κύριος σεισμός η κατανομή της πιθανότητας των μετασεισμών που τον ακολουθούν μέχρι χρονικό διάστημα έξι μηνών μπορεί να θεωρηθεί ομοιόμορφη και επίσης ότι δεν επηρεάζεται από προηγούμενους μετασεισμούς.

Με βάση την προηγούμενη παραδοχή, οι πιθανότητες υπολογίζονται με τη βοήθεια της σχέσης (Newmark and Rosenblueth, 1971):

$$P(n) = \frac{\lambda^n e^{-\lambda}}{n!} \quad (6)$$

όπου:

$P(n)$: η πιθανότητα να γίνουν ακριβώς n μετασεισμοί.

λ : ο αναμενόμενος αριθμός μετασεισμών στην περίοδο των έξι μηνών που είναι ικανοί να δώσουν μιά δεδομένη επιτάχυνση στη θέση μελέτης.

n : ο αριθμός των μετασεισμών.

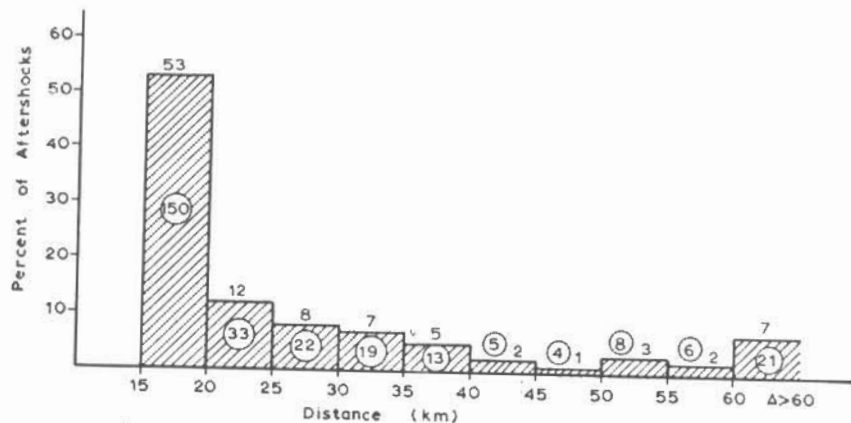


Fig.4 Histogram of spatial distribution of Aftershocks

Πιθανότητα να γίνουν N μετασεισμοί ικανοί να δώσουν επιτάχυνση στη θέση μελέτης ίση η μεγαλύτερη δεδομένης A_S

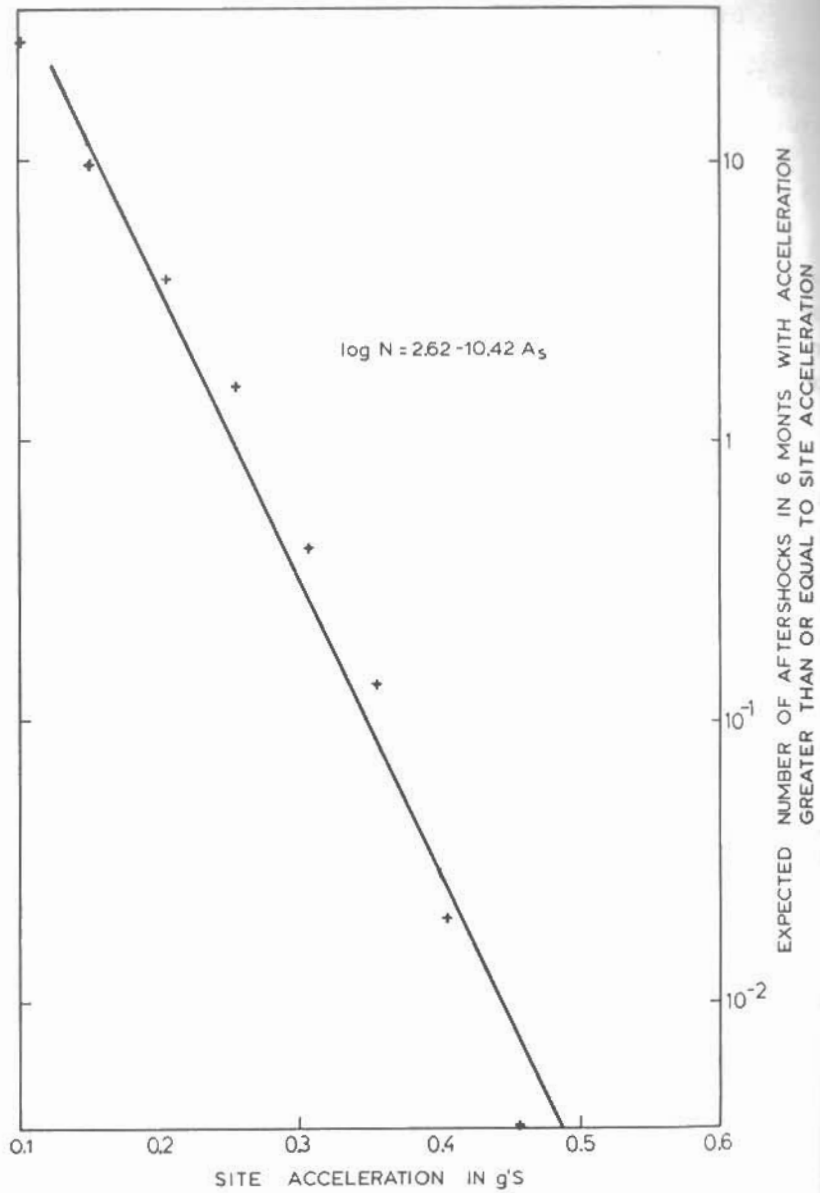


Fig.5. Site acceleration vs expected number of aftershocks exceeding the site acceleration.

A_S (g)	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45
0	9.7×10^{-1}	6.5×10^{-1}	2.7×10^{-1}	9.0×10^{-2}	2.8×10^{-2}	8.5×10^{-3}
1	8.9×10^{-1}	2.8×10^{-1}	4.0×10^{-2}	4.0×10^{-3}	3.9×10^{-4}	3.3×10^{-5}
2	6.7×10^{-1}	8.8×10^{-2}	4.1×10^{-3}	1.3×10^{-4}	3.7×10^{-6}	1.1×10^{-7}
3	4.5×10^{-1}	2.1×10^{-2}	3.1×10^{-4}	3.1×10^{-6}	2.7×10^{-8}	$< 10^{-9}$
4	2.7×10^{-1}	4.3×10^{-3}	1.9×10^{-5}	5.8×10^{-8}	$< 10^{-9}$	
5	1.3×10^{-1}	7.3×10^{-4}	1.0×10^{-6}	$< 10^{-9}$		
6	6.3×10^{-2}	1.1×10^{-4}	4.0×10^{-8}			
7	2.5×10^{-2}	1.3×10^{-5}	$< 10^{-9}$			
8	9.0×10^{-3}	1.5×10^{-6}				

Αριθμός μετασεισμών σχεδιασμού για δεδομένη επιτάχυνση

Επιτάχυνση στη θέση μελέτης A_S (g)	Αριθμός μετασεισμών σχεδιασμού
0.44	1
0.32	1
0.27	1
0.25	1
0.23	1
0.22	1
0.21	1
0.20	1

στη σχέση (6) ο αναμενόμενος αριθμός μετασεισμών, λ , μεταβάλλεται ανάλογα με την τιμή της επιτάχυνσης και επιλέγεται από τη σχέση (5). Με τον τρόπο αυτό υπολογίζονται οι πιθανότητες για διάφορες τιμές του λ που αντιστοιχούν σε τιμές επιτάχυνσης μεταξύ 0.20g και 0.45g. Τέλος οι πιθανότητες αυτές χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της πιθανότητας να γίνει υπέρβαση ενός δεδομένου πλήθους σεισμών που προκαλούν επιτάχυνση στη θέση με τιμή μεγαλύτερη ή ίση κάποιας δεδομένης. Οι πιθανότητες αυτές παρουσιάζονται στον πίνακα II για τιμές επιτάχυνσης από 0.20g έως 0.45g. Για τις ίδιες τιμές της επιτάχυνσης το σχήμα 6 δείχνει τη μεταβολή της πιθανότητας υπέρβασης σε συνάρτηση του πλήθους των μετασεισμών. Όπως φαίνεται από τον πίνακα II και το σχήμα 6 οι πιθανότητες ελαττώνονται καθώς η επιτάχυνση και το πλήθος των μετασεισμών μέσα στους έξι μήνες αυξάνει.

6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΜΕΤΑΣΕΙΣΜΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

6.1. Πιθανολογικές παραδοχές

Ο καθορισμός της πιθανότητας ετήσιας εμφάνισης ή υπέρβασης του σεισμού σχεδιασμού που μπορεί να διακινδυνεύσει ο κατασκευαστής ενός έργου είναι πάντα συνάρτηση της σπουδαιότητας του έργου και των συνεπειών που μπορεί να έχει στην κοινωνικοοικονομική ζωή του τόπου τυχόν καταστροφή του. Αν λ.χ. πρόκειται για πυρηνικό σταθμό ενέργειας η ετήσια πιθανότητα υπέρβασης του σεισμού σχεδιασμού δεν πρέπει να ξεπερνάει το 10^{-4} . Το έργο δηλαδή πρέπει να σχεδιαστεί έτσι ώστε να αντέξει, με ελαφρές βλάβες, σε σεισμό που έχει πιθανότητα μία στις χίλιες να συμβεί σε κάθε χρόνο ζωής του. Αντίστοιχα για σεισμό που θα προκαλέσει σοβαρές καταστροφές η παραδεκτή πιθανότητα υπέρβασης είναι περίπου 10^{-7} (ASCE, 1976).

Για λόγους εφαρμογής και μόνο θα γίνει προσπάθεια να υπολογιστεί ο αριθμός των μετασεισμών που πρέπει ο μηχανικός να πάρει υπόψη του και που είναι ικανοί να δώσουν στη Λάρισσα επιταχύνσεις μεγαλύτερες του 0.2g στην υποθετική περίπτωση

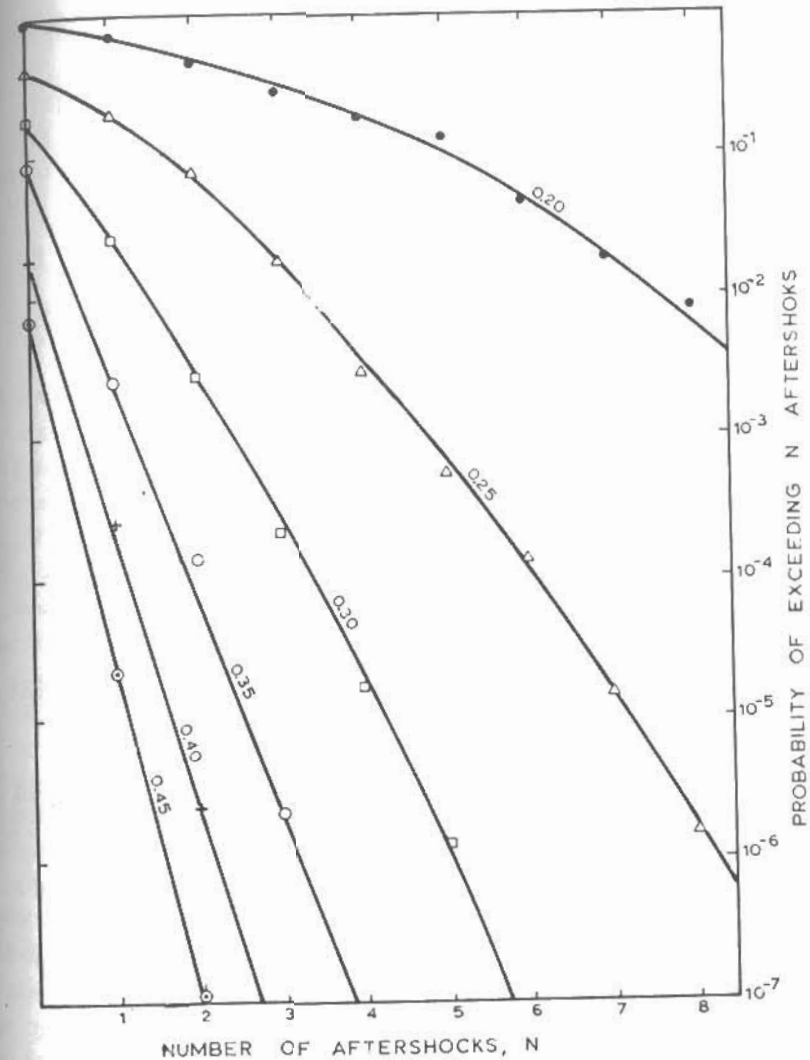


Fig.6. Probability distribution of site acceleration from aftershocks.

που ο σεισμός σχεδιασμού ($M = 7.0$) συμβεί ακριβώς κάτω από την πόλη και σε ένα μέσο βάθος 15 χλμ. Σύμφωνα με τη σχέση (2) ένας τέτοιος σεισμός θα δώσει μέγιστη επιτάχυνση 0.48g.

Γενικά ισχύει:

$$P_{(MK)} = P_{(ME/KS)} \cdot P_{(KS)} \quad (7)$$

όπου: $P_{(MK)}$: η συνδυασμένη πιθανότητα μετασεισμού (ΜΕ) και κύριου σεισμού (ΚΣ).

$P_{(ME/KS)}$: η πιθανότητα να έχουμε ΜΕ όταν γίνει ο ΚΣ

και $P_{(KS)}$: η πιθανότητα να γίνει ο ΚΣ.

Όπως αναφέρθηκε πριν ο σεισμός σχεδιασμού για τη Λάρισα έχει περίοδο επανάληψης 975 χρόνια δηλαδή ετήσια πιθανότητα υπέρβασης περίπου 10^{-3} . Αν λοιπόν δεχτούμε μιά πιθανότητα 10^{-5} σαν συνδυασμένη πιθανότητα υπέρβασης κύριου σεισμού και μετασεισμών τότε από τη σχέση (7) έχουμε $P_{(ME/KS)} = 10^{-2}$. Δηλαδή μιά πιθανότητα 10^{-2} να έχουμε μετασεισμούς μετά κάποιον κύριο σεισμό. Η πιθανότητα 10^{-2} σε συνδυασμό με τις τιμές του πίνακα II μας δίνουν τον αριθμό των μετασεισμών που πρέπει να ληφθούν υπόψη στο σχεδιασμό.

6.2. Αποτελέσματα

Με δεδομένο το όριο του 10^{-2} που θέσαμε για την τιμή της παραδεκτής πιθανότητας υπέρβασης μιας τιμής επιτάχυνσης μετασεισμού στη θέση μελέτης, A_S , από τον πίνακα II έχουμε:

- 1) Για $A_S \geq 0.45g$ η πιθανότητα να παρουσιαστεί καν μετασεισμός είναι μικρότερη του 10^{-2} . Έτσι δε χρειάζεται να σχεδιαστεί ένας τέτοιος μετασεισμός.
- 2) Για $A_S \geq 0.40g$ η πιθανότητα να μη συμβεί κανένας είναι μεγαλύτερη του 10^{-2} ενώ ένας, μικρότερη του 10^{-3} . Το ίδιο ισχύει μέχρι την τιμή $A_S \geq 0.33g$. Ο συνδυασμός έξ' άλλου των σχέσεων (5) και (6) μας δίνει επιτάχυνση με πιθανότητα 10^{-2} ίση με 0.44g. Έτσι ο σχεδιασμός πρέπει να γίνει για ένα μετασεισμό με $A_S = 0.44g$ και που καλύπτει τις περιπτώσεις για $A_S \geq 0.33g$.

3) Για $A_S \geq 0.32g$ η πιθανότητα να υπερβούμε τον ένα μετασεισμό είναι μεγαλύτερη του 10^{-2} , ενώ αυτή των δύο μετασεισμών είναι μικρότερη του 10^{-2} . Άρα ο σχεδιασμός πρέπει να γίνει με μόνο δύο μετασεισμούς ικανούς να δώσουν $A_S \geq 0.32g$. Ο ένας είναι ήδη ο μετασεισμός με $A_S = 0.44g$ οπότε απομένει ένας ακόμα στην τιμή $A_S = 0.32$. Το ίδιο ισχύει μέχρι $A_S \geq 0.28g$.

Με τον ίδιο τρόπο βλέπουμε ότι: πιθανότητα 10^{-2} για τρεις μετασεισμούς έχουμε από $A_S \geq 0.27g$ έως $A_S \geq 0.26g$, οπότε ο τρίτος θα πρέπει να σχεδιαστεί με $A_S = 0.27g$, πιθανότητα 10^{-2} για τέσσερους: 0.25g - 0.24g, άρα ο τέταρτος με $A_S = 0.25$. Ο πίνακας III περιέχει το πλήθος των μετασεισμών σχεδιασμού και τις τιμές επιτάχυνσης σχεδιασμού. Όπως παρατηρούμε εκτός του κύριου σεισμού με επιτάχυνση 0.48g, θα πρέπει να σχεδιαστούν και οι επιταχύνσεις που αναμένεται να εμφανιστούν μέσα στους επόμενους έξι μήνες από τη γένεση του κύριου σεισμού. Αυτές είναι: 0.44g, 0.32g, 0.27g, 0.25g, 0.23g, 0.22g, 0.21g και 0.20g.

7. ΣΥΣΗΤΗΣΗ

Η εργασία αυτή είχε σα σκοπό να αναπτύξει μια πιθανολογική μέθοδο υπολογισμού των μετασεισμών που είναι ικανοί να προξενήσουν πρόσθετες βλάβες σε ένα έργο που ήδη καταπονήθηκε από τον κύριο σεισμό. Έτσι ξεκινώντας από τη γνώση της σεισμικότητας της περιοχής μελέτης, καθορίζεται ο σεισμός σχεδιασμού για το συγκεκριμένο έργο. Και αυτό γιατί ο καθορισμός της παραδεκτής στάθμης διακινδύνευσης γίνεται αφού μελετηθούν οι συνέπειες μιάς τυχόν βλάβης ή και καταστροφής του έργου πάνω στην κοινωνικοοικονομική ζωή του τόπου. Αυτό έχει σα συνέπεια κάθε έργο να έχει τη δική του στάθμη ασφάλειας και η οποία είναι τόσο μεγαλύτερη όσο μεγαλύτερη είναι και η σπουδαιότητα του έργου. Μετά τον καθορισμό του σεισμού σχεδιασμού ακολουθεί η συλλογή των μετασεισμικών σειρών που πρέπει να πληρούν κριτήρια όπως (α) να έχουν κύριο σει-

σμό παραπλήσιου μεγέθους με τον σεισμό σχεδιασμού, (β) να έχουν γίνει σε περιοχές με όσο το δυνατόν όμοιες γεωτεκτονικές συνθήκες, (γ) η μετασεισμική περιοχή να είναι τόση ώστε να περιλαμβάνει μετασεισμούς που μπορούν να δώσουν επιτάχυνση στο σημείο μελέτης πάνω από ένα όριο π.χ. 0.10g και (δ) χρονικά να έχουν γίνει σε διάστημα αρκετό ώστε να προφτάσουν να γίνουν οι απαραίτητες διορθωτικές εργασίες. Σ' αυτή την εργασία υιοθετήθηκε περίοδος εξι μηνών. Σε ότι αφορά την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων θα πρέπει να έχουμε υπόψη τους περιορισμούς που υπάρχουν. Τέτοιοι περιορισμοί είναι κυρίως: 1) Ο περιορισμένος αριθμός σειρών για ένα συγκεκριμένο τόπο και έτσι να χρησιμοποιούνται και σειρές από άλλες πιά σεισμικές περιοχές με αποτέλεσμα να ικανοποιήται μερικώς το κριτήριο (β), 2) οι παράμετροι των μετασεισμών ($M < 5.0$) τις περισσότερες φορές δεν είναι επακριβώς γνωστές. Αυτό ισχύει για τους σεισμούς πριν το 1964 και κυρίως για τις πρώτες δεκαετίες του αιώνα μας. Σε πολλές περιπτώσεις υιοθετούνται οι παράμετροι του κύριου σεισμού. Για το λόγο αυτό το ιστόγραμμα του σχήματος 4 παρουσιάζει την πιο συντηρητική περίπτωση κατανομής. Με δεδομένο ότι οι παραδοχές που έγιναν σαυτή την εργασία ήσαν μάλλον δυσμενείς από άποψη σεισμικού κινδύνου, τα αποτελέσματα για τη Λάρισα του πίνακα III αφορούν επίσης δυσμενή περίπτωση αντισεισμικού σχεδιασμού.

- American Society of Civil Engineers, 1976, "Structural Analysis and Design of Nuclear Plant Facilities, "Draft - trial Use and Comment.
- Drakopoulos, J., 1976. On the seismic zoning problems in Greece, Proc. of the seminar on seismic zoning maps, UNESCO-Skopje, 1, 300-335.
- Drakopoulos J., and Makropoulos, K.C., 1983. Seismicity and Hazard analysis studies in the area of Greece, Technical Report 1-83, Seism. Lab., Athens University, 184 pp.
- Esteva, L., and Rosenblueth, E., 1964. Espectos de temblores a distancias moderadas y grandes, Bol.Soc. Mex.In.Sismica, 2, 1-18.
- Makropoulos, K.C., 1978. The statistics of large earthquake magnitude and an evaluation of Greek seismicity. PhD Thesis, Edinburgh-University, 193 pp.
- Makropoulos, K.C. and Burton, P.W., 1981. A catalogue of seismicity in Greece and adjacent areas. Geophys.J.R. astr. Soc., 65, 741-762.
- Makropoulos, K.C., and Burton, P.W., 1983. Seismic hazard in Greece: I Magnitude recurrence, Inst. Geol.Sci., Glob. Seism. Unit. Report No 203, (submitted to Tectonophysics).
- Newmark, N.M. and Rosenblueth, E. 1971. "Fundamentals of Earthquake Engineering, "Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.

Papazachos, B.C., 1974. Aftershock and foreshock sequences in the area of Greece during the period 1911-1973

Papazachos, B.C. and Comninakis, P.E., 1982. A catalogue of earthquakes in Greece and the surrounding area for the period 1901-1980. Un. of Thess.Geoph.Lab., 5, 1982, 146 pp.